調合因子がCFRCのフレッシュ時および硬化時の特性に及ぼす影響

軽量炭素繊維補強コンクリート(CFRC)の調合と基礎物性に関する実験的研究(その1)

INFLUENCES OF FACTORS OF MIX PROPORTIONS ON PROPERTIES
OF FRESH AND HARDENED CFRCSExperimental study on mix proportions and fundamental properties
of light-weight carbon fiber reinforced concrete (CFRC) (Part 1)

三井 宜之*, 村上 聖**, 坂井 廣道***, 江良 弘樹****

武田 浩二*****, 中村 守康*****

Yoshiyuki MITSUI, Kiyoshi MURAKAMI, Hiromichi SAKAI, Hiroki ERA,
Koji TAKEDA and Moriyasu NAKAMURA

Light-weight carbon fiber reinforced concrete (CFRC) is a new building material with light weight and high tensile strength. This study aims at obtaining an optimum mix proportion of the CFRC. The used materials are low-shrinkage cement, high-performance pitch-based carbon fibers, silica sands plus Sirasu balloon and some admixtures. The parameters of the experiments are unit cement content, grain size of silica sand, water-cement ratio, fiber volume fraction, fiber length and mix ratio of silica sand and Sirasu balloon. Fiber dispersion, flow and air content of the fresh CFRC, and specific gravity, compressive and flexural strengths of the hardened one were evaluated.

Keywords : light-weight carbon fiber reinforced concrete, mix proportions, fresh CFRC properties, hardened CFRC properties

軽量炭素繊維補強コンクリート, 調合, フレッシュ時の特性, 硬化時の特性

1. はじめに

軽量炭素繊維補強コンクリート(厳密には繊維補強モルタルであるが、通常、繊維補強コンクリートと呼んでいるので、ここでもその通称を用いる、以下CFRCと略記)は、普通コンクリートに比べて、軽量で引張強度が高いため、各種建材への用途開発が進められている。なかでも、コンクリートのひび割れ・欠損防止や軽量化が要求されるカーテンウォールは、CFRCのもつ高い曲げ強度を利用して、補強筋の低減化や大幅な薄肉・軽量化が可能となるためにすでに数多くの使用実績がある^{1)~5)}。筆者らも、CFRCを用いた寸法約3×3m、厚さが100mmのリブ付きカーテンウォールの実大版について静的曲げ載荷試験を行い、補強筋なしでも実用上十分な耐力が得られることを実験的に確認している⁶⁾。また、CFRCの基礎的な力学的特性や耐久性などについてもこれまでに比較的多くの実験データが公表されている⁷⁾¹³⁾。しかし、CFRCの実施工における所要のフレッシュ時および硬化時の特性を得るための使用材料や調合の選定についての報告例は数少ない。

そこで、本研究では、単位セメント量、使用骨材のうちのけい砂の粒径や軽量化のために用いたシラスバルーンの混合割合、水セメント比、繊維体積率、繊維長さなどの調合因子が、CFRCのフレッシュ時および硬化時の特性に及ぼす影響に関して広範囲の実験を行い、繊維分散性、フロー値、空気量、気乾比重、脱型時強度、材料強度に対して所要の設計目標値を得るための最適調合の選定について検討した。なお、ここで提示する最適調合は普遍的なものでなく、使用材料や設計目標基準が異なれば、最適調合も変化するの当然である。しかし、最適調合選定に対する方法論や、調合因子がCFRCの基礎物性に及ぼす影響について得られた実験結果や知見などは一般に供しうるデータとして有用と考えられる。

2. 実験方法

2.1 CFRCの使用材料

本実験におけるCFRCの使用材料を表1に示す。セメントには、乾燥収縮が小さく、寸法安定性にすぐれ、大型タイルパネルの打込みが可能な低収縮セメントを使

* 熊本大学工学部建築学科 教授・工博

** 熊本大学工学部建築学科 助教授・工博

*** 三菱化学(株)黒崎事業所 工博

**** 秩父小野田(株)中央研究所 工修

***** 熊本大学大学院自然科学研究科

大学院生・工修

***** 三菱化学(株)黒崎事業所 工修

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kumamoto University, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kumamoto University, Dr. Eng.

Kurosaki Plant, Mitsubishi Chemical Corporation, Dr. Eng.

Central Research Institute, Chichibu Onoda Corporation, M. Eng.

Graduate Student, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, M. Eng.

Kurosaki Plant, Mitsubishi Chemical Corporation, M. Eng.

用した。本セメントは、別名GRCセメントと呼ばれ、高アルミナ低石灰型の低アルカリ性セメントであり、その物理的性質と化学成分を表2に示す。骨材には、熊本産の各種粒度分布をもつけい砂と、軽量化のためにシラスバルーンを混合したものを使用した。けい砂とシラスバルーンの粒度分布と化学成分をそれぞれ表3, 4に示す。混和剤には、分散剤としてメチルセルロース、高性能減水剤として高縮合トリアジン系化合物、消泡剤としてアルキレンオキシド系化合物、低収縮セメントの凝結時間調節剤としてクエン酸をそれぞれ使用した。繊維には、高強度・高弾性タイプのピッチ系炭素繊維で、連続繊維の状態で特殊な水溶性サイジングを施した後、所定の長さ（ここでは、3, 6, 10, 18および25mmの5種類）に切断したものを使用した。なお、使用材料の選定については、本研究の範囲外であり、これら使用材料は、過去の予備的な試行実験の結果に基づいて選定された。

2.2 CFRCの使用割合

実用的なCFRCのフレッシュ時および硬化時の特性を得るための最適割合の選定を目的に、ここでは次の一連のシリーズについて実験的検討を行った。

(1) シリーズ①

ここでは、即日脱型が可能な初期強度と軽量化に要する気乾比重を得るための単位セメント量を選定する目的で、単位水量を 450kg/m^3 一定とし、メーカー推奨の単位セメント量 900kg/m^3 を満足する 950kg/m^3 を中心に単位セメント量を $750\sim 1150\text{kg/m}^3$ の範囲で変化させ、単位セメント量がCFRCのフレッシュ時および硬化時の特性に及ぼす影響について調べた。シリーズ①の使用割合は表5に示すとおりである。なお、繊維長さおよび繊維体積率、混和剤使用量（対セメント質量）は表中に示す値に固定した。また、使用けい砂は5号または6号で、けい砂とシラスバルーンの混合割合は1:1（質量比）で一定とした。

(2) シリーズ②

シリーズ①の実験結果に基づき、所要の脱型強度と気乾比重が得られる単位セメント量の範囲で、骨材セメント比を25%一定として、水セメント比を40~60%の範囲で変化させ、またけい砂に5, 6, 7, 8号および粉末けい砂の5種類を使用して、水セメント比および骨材粒径がCFRCのフレッシュ時および硬化時の特性に及ぼす影響について調べた。シリーズ②の使用割合は表6に示すとおりである。なお、繊維長さおよび繊維体積率、混和剤の使用量（対セメント質量）は表中に示す値に固定し、けい砂とシラスバルーンの混合比は1:1で一定とした。

(3) シリーズ③

ここでは、繊維長さを18mm一定として、繊維体積率を1.0, 1.5, 2.0, 2.5および3.0%の5水準で変化させ、繊維体積率がCFRCのフレッシュ時および硬化時の特性に

表1 CFRCの使用材料

セメント	低収縮セメント
骨 材	けい砂 5,6,7,8 号および粉末けい砂 比重 = 2.7 シラスバルーン 比重 = 1.0
混 和 剤	分散剤 : メチルセルロース 高性能減水剤 : 高縮合トリアジン系化合物 消泡剤 : アルキレンオキシド系化合物 凝結時間調節剤 : クエン酸
繊 維	ピッチ系炭素繊維 比重 = 1.9 寸法 $\phi 17 \mu\text{m} \times 3,6,10,18$ および 25mm 引張強度 = 18000kgf/cm^2 引張弾性率 = $1.8 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$

表2 低収縮セメントの物理的性質と化学成分

比重	比表面積 (cm^2/g)	化学成分 (%)				
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃
2.97	4700	23	11	1	48	9

(T社資料より抜粋)

表3 けい砂の粒度分布と化学成分

けい砂	メッシュ目開き (μm) 注1)									化学成分 (%)		
	590	420	297	210	149	105	74	53	Pan	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
5号	10.6	66.1	19.1	3.01	0.33	0.03	-	-	-	78.54	12.28	0.31
6号	-	15.6	42.3	29.9	8.51	2.47	0.57	0.03	-	76.07	13.07	0.49
7号	-	-	0.43	18.1	35.5	29.5	13.5	1.09	0.90	75.97	13.44	0.51
8号	-	-	-	0.30	2.40	24.2	25.0	19.0	27.0	76.17	13.23	0.49

注1) 表中の数値は、各メッシュの残留率(%)を示す。

(K社資料より抜粋)

表4 シラスバルーンの粒径分布と化学成分

粒径 (μm)			化学成分 (%)						
75 以上	45 ~ 74	44 以下	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	
60 ~ 75 %	22 ~ 30 %	7 ~ 12 %	64 ~ 70	11 ~ 16	1.0 ~ 4.0	1.5 ~ 2.5	0.5 ~ 2.0	0.1 ~ 4.0	

(S社資料より抜粋)

及ぼす影響を調べた。シリーズ③の使用割合は表7に示すとおりである。なお、シリーズ②までの実験結果に基づき、骨材セメント比は25%一定、水セメント比は47.5%一定（なお、繊維体積率が3.0%については、練混ぜの実状に応じ50%とした）、使用けい砂は6号と8号、けい砂とシラスバルーンの混合比は1:1として、混和剤使用量

表5 シリーズ①の使用調合

l_f (mm)	V_f (%)	W/C (%)	S/C (%)	使用 けい砂	単位量 (kg/m ³)		
					セメント	水	骨材
18	1.8	60	45	5,6号	750	450	335
		53	34	5,6号	850		286
		47	25	5,6号	950		237
		46	23	5号	975		224
		45	21	5号	1000		212
		44	20	5号	1025		200
		43	18	5,6号	1050		187
		39	12	5,6号	1150		138

注1) l_f : 繊維長さ、 V_f : 繊維体積率、W/C: 水セメント比、S/C: 骨材セメント比(質量比)

2) 骨材は、けい砂: シラスパルーン = 1:1(質量比)一定

3) メチルセルローズ、高性能減水剤、消泡剤、クエン酸は、セメント質量のそれぞれ0.25%, 3%, 2% および0.5%を混入した。

(対セメント質量)は表中に示す値に固定した。

(4) シリーズ④

ここでは、繊維体積率を1.8%一定とし、繊維長さを3, 6, 10, 18および25mmの5水準で変化させ、繊維長さがCFRCのフレッシュ時および硬化時の特性に及ぼす影響を調べた。シリーズ④の使用調合は表8に示すとおりである。なお、シリーズ③までの実験結果に基づき、単位セメント量は948kg/m³一定、水セメント比は47.5%一定、骨材セメント比は25%一定、使用けい砂は6号と8号、けい砂とシラスパルーンの混合比は1:1とし、混和剤使用量(対セメント質量)は表中に示す値に固定した。

(5) シリーズ⑤

ここでは、繊維体積率を1.8%一定とし、繊維長さが3, 10, 18mmについて、けい砂: シラスパルーン(質量比)を5:1, 3:1, 1:1, 1:3および1:5の5水準で変化させ、けい砂とシラスパルーンの混合比がCFRCのフレッシュ時および硬化時の特性に及ぼす影響を調べた。シリーズ⑤の使用調合を表9に示す。なお、シリーズ④までの実験結果に基づいて、骨材セメント比は25%一定、水セメント比は47.5%一定(ただし、けい砂: シラスパルーンが1:5については、練混ぜの実状に応じて、47.5~52.5%の範囲で変化させた)、使用けい砂は8号とし、混和剤使用量(対セメント質量)は表中に示す値に固定した。

2.3 CFRCの練混ぜ

CFRCの練混ぜには、シリーズ①~③については容量が10lの、シリーズ④、⑤については容量が30lのオム

表6 シリーズ②の使用調合

l_f (mm)	V_f (%)	W/C (%)	S/C (%)	使用けい砂	単位量 (kg/m ³)		
					セメント	水	骨材
18	1.8	40	25	5号	1026	410	257
		42.5		6号	1000	424	250
		45		5,6,7,8号, 粉末	973	438	243
		47.5		7,8号, 粉末	948	450	237
		50		5,6,7,8号, 粉末	927	462	232
		52.5		7,8号, 粉末	902	474	226
		55		5,6,7,8号, 粉末	881	485	220
		57.5		6号	862	495	215
		60		5号	843	504	211

注1) 骨材は、けい砂: シラスパルーン = 1:1(質量比)一定

2) メチルセルローズ、高性能減水剤、消泡剤、クエン酸は、セメント質量のそれぞれ0.25%, 3%, 2% および0.5%を混入した。

表7 シリーズ③の使用調合

l_f (mm)	V_f (%)	W/C (%)	S/C (%)	使用 けい砂	単位量 (kg/m ³)		
					セメント	水	骨材
18	1.0	47.5	25	6,8号	956	454	239
	1.5				951	452	238
	2.0				946	449	237
	2.5				941	447	235
	3.0	50			936	468	234

注1) 骨材は、けい砂: シラスパルーン = 1:1(質量比)一定

2) メチルセルローズ、高性能減水剤、消泡剤、クエン酸は、セメント質量のそれぞれ0.25%, 3%, 2% および0.5%を混入した。

表8 シリーズ④の使用調合

l_f (mm)	V_f (%)	W/C (%)	S/C (%)	使用 けい砂	単位量 (kg/m ³)		
					セメント	水	骨材
3	1.8	47.5	25	6,8号	948	450	237
6							
10							
18							
25							

注1) 骨材は、けい砂: シラスパルーン = 1:1(質量比)一定

2) メチルセルローズ、高性能減水剤、消泡剤、クエン酸は、セメント質量のそれぞれ0.25%, 3%, 2% および0.5%を混入した。

表9 シリーズ⑤の使用調合

l_f (mm)	V_f (%)	W/C (%)	S/C (%)	使用 けい砂	けい砂: シラスパルーン (質量比)	単位量(kg/m ³)		
						セメント	水	骨材
3, 10, 18	1.8	47.5	25	8号	5:1	1002	476	250
					3:1	988	469	247
					1:1	948	450	237
					1:3	912	433	228
3		47.5			1:5		428	225
10		52.5				900	473	
18		50					450	

注1) マチセルローズ、高性能減水剤、消泡剤、クエン酸は、セメント質量のそれぞれ0.25%, 3%, 2% および0.5%を混入した。

ニミキサーを使用した。また、練混ぜ手順は、予備実験の結果に基づき、セメント、骨材、炭素繊維および分散剤をドライミキシング後、水、高性能減水剤およびクエン酸を投入しウェットミキシングを行った後に、消泡剤を投入し、その後所定時間まで練混ぜを行った。なお、ドライミキシング時間は30秒、消泡剤投入までのウェットミキシング時間は15秒一定とし、その後の練混ぜについては予備実験を行い、適正な練混ぜ時間を検討した。試験は、表10に示す使用調合について、ウェットミキシング開始後30秒ごとに試料のサンプリングを行い、フロー値、材齢16時間後の脱型時の曲げ強度と圧縮強度を測定した。なお、フロー値および曲げ強度の測定は、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準拠して行い、圧縮強度試験にはφ5×10cm円柱供試体を用いた。また、供試体は各サンプリングごとに3個ずつ作製し、約20℃の恒温室内で気中養生を行った。

図1に、練混ぜ時間に関する予備実験結果を示す。繊維分散状況は、ウェットミキシング開始後30秒の時点ではファイバーボールが確認されたが、その後はファイバーボールもなく、繊維の分散性は良好であった。また、繊維分散性の向上により、練混ぜ時間の増加とともにフロー値は増大するのに対し、曲げ強度は練混ぜ時間が60秒を越えると減少する傾向がみられる。これは、ミキサーのせん断かくはんにより、繊維が折損し、繊維による曲げ補強効果が低下するためであると考えられ、フレッシュ状態のCFRCをスクリーニングし、目視により繊維の折損が観察された。以上の結果より、本実験では、ウェットミキシング時間を60秒とした。

2.4 試験方法

CFRCのフレッシュ時の特性は、次の項目について

表10 練混ぜ時間に関する予備実験に使用した調合

l_f (mm)	V_f (%)	W/C (%)	S/C (%)	使用 けい砂	単位量(kg/m ³)		
					セメント	水	骨材
18	1.8	45	25	5号	973	438	243

注1) 骨材は、けい砂：シラスパルーン＝1：1(質量比)一定
2) マチセルローズ、高性能減水剤、消泡剤、クエン酸は、セメント質量のそれぞれ0.25%, 3%, 2% および0.5%を混入した。

図1 練混ぜ時間に関する予備実験結果

検討した。

①繊維の分散性

繊維の分散状態は、目視と手触りで、しこり感およびファイバーボールの有無により確認した。

②フロー値

フロー値の測定は、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準拠して行った。

③空気量

空気量は、JIS A 1128に準拠し、モルタルエアメーターにより測定した。

CFRCの硬化時の特性として、気乾比重、圧縮強度および曲げ強度などを、各シリーズについて、表11に示す試験条件で測定した。圧縮および曲げ強度試験用供試

体には、シリーズ①～③ではそれぞれ $\phi 5 \times 10\text{cm}$ 円柱、 $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ 角柱を、シリーズ④、⑤ではそれぞれ $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 角柱を用いた。ここで、シリーズ①～③とシリーズ④、⑤で供試体寸法が異なるのは、シリーズ④、⑤では、繊維長さを変化させているので、繊維の配向の影響が大きくなるように、寸法の大きな供試体を用いたものである。なお、供試体の成形は、CFRCを型枠に2層に分けて詰め、シリーズ①～③については突き棒と木づちにより、シリーズ④、⑤については高周波振動機により締固めを行った。また、供試体は各調合ごとに3個ずつ作製し、試験時まで約 20°C の恒温室内で気中養生を行った。

気乾比重は、シリーズ①について材齢16時間後の脱型時に、シリーズ②～⑤については材齢24時間後の脱型時と材齢20日後の強度試験時に、強度試験用供試体の気乾質量を供試体の外形寸法により算定した容積で割って求めた。圧縮試験では、シリーズ①～③について圧縮強度を、シリーズ④、⑤についてはコンプレッソメーターにより圧縮応力-ひずみ曲線を測定し、圧縮強度とヤング係数（1/3割線弾性係数）をそれぞれ求めた。曲げ試験では、シリーズ①～③についてJIS R 5201に準拠して曲げ強度を求め、シリーズ④、⑤については中央集中3点曲げ荷重により荷重-載荷点変位曲線を測定し、曲げ強度と曲げ強度時の載荷点変位を求めた。また、シリーズ④では、一部について $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱供試体を用いて、割裂引張強度を求めた。

CFRCの所要のフレッシュ時および硬化時の特性を得るための最適調合の選定の目安として、過去の予備実験や実際の施工経験に基づいて、上記の特性値に対して設計目標値を表12に示すように設定した。

3. 実験結果および考察

3.1 シリーズ①「単位セメント量の影響」

(1) フレッシュ時の特性

図2に、単位セメント量に対するフロー値および空気量の変化を示す。なお、繊維の分散性は、いずれの調合についてもしこり感やファイバーボールはなく、良好であった。フロー値は、ほぼ150前後で、設計目標値の130以上を満足している。また、使用けい砂が5号では、単位セメント量によらず、フロー値はほぼ一定であるが、5号よりも粒径の小さい6号の場合には単位セメント量の増加につれてフロー値が増加し、骨材粒径の影響がみられる。空気量は、ほぼ6%前後で、設計目標値の $6 \pm 2\%$ を満足しており、単位セメント量や骨材粒径の影響はあまりみられない。

(2) 硬化時の特性

図3に、単位セメント量に対する（材齢16時間後の脱型時における）気乾比重、圧縮強度および曲げ強度の変

表11 各シリーズの試験条件

シリーズ	シリーズ①	シリーズ②	シリーズ③	シリーズ④	シリーズ⑤
試験項目					
気乾比重	*材齢16時間後脱型時 *強度試験用供試体使用	*材齢24時間後脱型時、材齢20日後強度試験時 *強度試験用供試体使用		*材齢24時間後脱型時、材齢20日後強度試験時 *強度試験用供試体使用	
圧縮試験	*材齢16時間後脱型時 * $\phi 5 \times 10\text{cm}$ 円柱(各3)	*材齢20日後 * $\phi 5 \times 10\text{cm}$ 円柱(各3)		*材齢20日後 * $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱(各3) *圧縮応力-ひずみ曲線測定	
曲げ試験	*材齢16時間後脱型時 * $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ 角柱(各3) *JIS R 5201に準拠	*材齢20日後 * $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ 角柱(各3) *JIS R 5201に準拠		*材齢20日後 * $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 角柱(各3) *中央集中3点曲げ荷重(スパン長さ30cm) *荷重-載荷点変位曲線測定	
割裂引張試験				*材齢20日後 * $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱(各3) *JIS A 1113に準拠	

表12 最適調合の選定に対する設計目標値

評価項目	設計目標値
フレッシュ時	繊維分散性 しこり感やファイバーボールがないこと
	フロー値 130 以上
	空気量 $6 \pm 2\%$ *軽量コンクリートの空気量の標準的値の5%に繊維による空気の流れを見込んで1%上乗せ
硬化時	気乾比重 1.4 ～ 1.7（軽量コンクリート2種相当）
	脱型強度 材齢16時間後の圧縮強度が 70kgf/cm^2 以上 材齢16時間後の曲げ強度が 50kgf/cm^2 以上
	材料強度 材齢20日後の圧縮強度が 200kgf/cm^2 以上 材齢20日後の曲げ強度が 100kgf/cm^2 以上

図2 単位セメント量に対するフロー値および空気量の変化

化を示す。気乾比重は、単位セメント量の増加につれてほぼ比例的に増加し、設計目標値の1.4～1.7（軽量2種相当）を満足する単位セメント量の範囲は約 1050kg/m^3

図3 単位セメント量に対する気乾比重、圧縮強度および曲げ強度の変化

以下となった。なお、気乾比重に及ぼす骨材粒径の影響はほとんどみられない。圧縮強度は、単位セメント量が 1050kg/m^3 以下の範囲では単位セメント量の増加につれてほぼ比例的に増大し、それ以上で圧縮強度の増加は頭打ちとなっている。ここで、脱型時圧縮強度の設計目標値である 70kgf/cm^2 以上を満足する単位セメント量の範囲は約 950kg/m^3 以上となった。曲げ強度は、単位セメント量の増加につれてほぼ比例的に増大し、使用けい砂が5号の場合に比べて6号の場合の方が全体的に曲げ強度が高く、その傾向は単位セメント量が少ないほど顕著になっている。ここで、脱型時曲げ強度の設計目標値である 50kgf/cm^2 以上を満足する単位セメント量の範囲はけい砂5号で約 950kg/m^3 以上、けい砂6号で約 850kg/m^3 以上となった。

以上より、気乾比重と脱型時強度の面から、単位セメント量は、約 $950\sim 1050\text{kg/m}^3$ の範囲が適切であるように思われる。

3.2 シリーズ②「骨材粒径および水セメント比の影響」

(1) フレッシュ時の特性

図4に、水セメント比に対するフロー値および空気量の変化を使用けい砂5, 6, 7, 8号および粉末けい砂について示す。なお、繊維の分散状況は、水セメント比がけい砂5号で40%、6号で42.5%、粉末で45%のときに手触りによりしこり感が確認され、水セメント比が小さくなると繊維の分散性が悪くなった。フロー値は、水セメント比の増加にほぼ比例して増加し、同一水セメント比に対して骨材粒径の小さいものほど、フロー値は若干大きくなる傾向がみられる。また、フロー値の設計目標値の130以上はすべての割合について満足している。空気量は、骨材粒径の違いによる差異に明確な傾向はみられず、水セメント比の増加にほぼ比例して減少している。また、

空気量の設計目標値である $6\pm 2\%$ は、ほとんどすべての割合について満足している。

(2) 硬化時の特性

図5に、水セメント比に対する気乾比重（材齢24時間後の脱型時と材齢20日後の強度試験時）、圧縮強度および曲げ強度（材齢20日後）の変化を示す。気乾比重は、材齢24時間後よりも材齢20日後の方が小さくなり、その程度は水セメント比が増加するほど大きくなっている。これは、空隙中の水分の蒸発によるものと考えられる。また、気乾比重の設計目標値である $1.4\sim 1.7$ は、ほぼすべての割合について満足し、気乾比重に及ぼす骨材粒径の影響はほとんどみられない。圧縮強度は、水セメント比の増加とともに減少するが、骨材粒径の違いによる明確な差異はみられない。ただ、他に比べて骨材粒径の大きいけい砂5号と6号について、水セメント比が55%以上で材齢20日後の圧縮強度の設計目標値である 200kgf/cm^2 以上が満足されなかった。曲げ強度は、圧縮強度ほど水セメント比の増加に伴う強度の低下はみられないが、骨材粒径が大きくなるほど曲げ強度は全体的に低下し、特

図4 水セメント比に対するフロー値および空気量の変化

図5 水セメント比に対する気乾比重、圧縮強度および曲げ強度の変化

にけい砂5号では他に比べて曲げ強度の低下が大きくなっている。ここで、材齢20日後の曲げ強度の設計目標値である100kgf/cm²以上は、けい砂5号を除いて十分に満足している。

以上より、骨材粒径の違いによる差異はあるものの、繊維の分散性と材齢20日後の強度の面から、全体として水セメント比は45～55%の範囲が適切であるように思われる。なお、骨材粒径の大きいけい砂5号は、曲げ強度の低下が大きいため、使用けい砂としては6, 7, 8号および粉末けい砂が適当である。

3.3 シリーズ③「繊維体積率の影響」

(1) フレッシュ時の特性

図6に、繊維体積率に対するフロー値および空気量の変化を示す。なお、繊維の分散状況は、使用けい砂が6号と8号ともに、繊維体積率が2.5%以上で手触りによるしこり感や若干のファイバーボールが確認された。フロー値は、繊維体積率が増加するほど大きく減少し、設計目標値の130以上は、繊維体積率が2.5%以上で満足されない場合がある。空気量は、繊維体積率が増加するほど増加しているが、設計目標値の6±2%は満足している。

(2) 硬化時の特性

図7に、繊維体積率に対する気乾比重（材齢24時間後の脱型時と材齢20日後の強度試験時）、圧縮強度および曲げ強度（材齢20日後）の変化を示す。気乾比重は、前述のように材齢24時間後よりも材齢20日後の方が小さくなっているが、繊維体積率の違いによる差異はほとんどみられず、材齢24時間後で約1.65、材齢20日後で約1.45となり、設計目標値の1.4～1.7を満足している。圧縮強度は、繊維体積率が2.5%以下の範囲では繊維体積率が増加するほど増加するが、それ以上の範囲で頭打ちの傾向がみられる。特に、使用けい砂が6号の場合、繊維体積

率が3.0%で圧縮強度が大きく低下して、材齢20日後の圧縮強度の設計目標値である200kgf/cm²以上が満足されない。これは、繊維体積率が2.5%以上で繊維分散性が悪くなることやフロー値の低下に伴う締固め不足に起因しているものと考えられる。曲げ強度は、繊維体積率が2.0%以下の範囲では繊維体積率が増加するほど顕著に増加しているが、それ以上の範囲で頭打ちの傾向がみられる。この理由として圧縮強度の場合と同様の原因に加え、繊維体積率が増加すると、塑性拘束に類似した現象により付着応力が增大するので、限界繊維長さが減少し、繊維の破断が生じた可能性も考えられる。また、骨材粒径の違いによる影響は、圧縮強度の場合と逆に粒径の大きいけい砂6号の方が8号の場合よりも曲げ強度は大きくなっている。

以上より、繊維の分散性や流動性の面からは繊維体積率は2.5%以下となるが、強度、特に曲げ強度に対する繊維の補強効率を含めて考えると、繊維体積率は1.0～2.0%の範囲が適切であるように思われる。

図6 繊維体積率に対するフロー値、空気量の変化

図7 繊維体積率に対する気乾比重、圧縮強度および曲げ強度の変化

3.4 シリーズ④「繊維長さの影響」

(1) フレッシュ時の特性

図8に、繊維長さに対するフロー値および空気量の変化を示す。なお、繊維の分散状況は、すべての繊維長さについてしこり感やファイバーボールもなく良好であった。フロー値は、繊維長さが増加するほど大きく減少するが、設計目標値の130以上はすべての調合について満足している。また、粒径の小さいけい砂8号の方が6号よりもフロー値は若干大きくなっている。空気量は、ばらつきはあるものの繊維長さによらず約8%程度で、設計目標値の $6 \pm 2\%$ の範囲を超えるものがあるが、消泡剤使用量の調整により対応できるものと考えられる。

(2) 硬化時の特性

図9に、繊維長さに対する気乾比重（材齢24時間後の脱型時と材齢20日後の強度試験時）、圧縮強度および曲げ強度（材齢20日後）の変化を示す。気乾比重は、繊維長さによらずほぼ一定で、材齢24時間後で約1.60、材齢20日後で約1.55と設計目標値である1.4～1.7を満足している。圧縮強度は、繊維長さが6mmでピークを示し、それ以上で繊維長さの増加とともに減少しているが、材令20日後の圧縮強度の設計目標値である 200 kgf/cm^2 以上はほぼすべての調合について満足している。また、粒径の大きいけい砂6号の方が8号よりも圧縮強度は全体的に大きくなっている。曲げ強度は、繊維長さが18mm以下では繊維長さの増加にほぼ比例して大きく増加しているが、それ以上の長さでは頭打ちの傾向がみられる。これは、繊維長さが増加するにつれて繊維長さが限界繊維長を超え、繊維の破断が生じるためと考えられる。なお、材齢20日後の曲げ強度の設計目標値である 100 kgf/cm^2 以上は、繊維長さが10mm以上で満足される。

図10に、繊維長さに対するヤング係数、割裂引張強度（材齢20日後）の変化を示す。ヤング係数は、繊維長さ

によらずほぼ一定で、 $1.0 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ と普通コンクリートに比べてかなり小さいが、これはマトリックスが軽量モルタルのためであると考えられる。また、ヤング係数に及ぼす骨材粒径の影響はほとんどみられない。割裂引張強度は、繊維長さによらず約 40 kgf/cm^2 とほぼ一定で、繊維長さの増加につれて引張強度に対する曲げ強度の比が顕著に大きくなることがわかる。このことは、繊維長さが増加するほど塑性変形能力が大きくなることを意味し、曲げ試験による荷重-載荷点変位曲線の測定値から曲げ強度時のたわみが繊維長さの増加とともに顕著に大きくなることが確認された。

以上より、材齢20日後の曲げ強度と曲げ強度に対する繊維の補強効率の面から繊維長さは10～18mmの範囲が適切であるように思われる。また、現時点でCFRCの塑性変形能力が部材設計に考慮されることはほとんどないが、塑性変形能力の向上には繊維長さの大きいものがある効であることが予想される。

図8 繊維長さに対するフロー値および空気量の変化

3.5 シリーズ⑤「けい砂・シラスバルーン混合比の影響」

(1) フレッシュ時の特性

図11に、シラスバルーン/(シラスバルーン+けい砂) (質量比) に対するフロー値および空気量の変化を示す。なお、繊維分散状況は、繊維長さが18mmについてはけい砂：シラスバルーン (質量比) が1:5のときに、繊維長さが3mmについてはすべての混合比について、ファイバーボールが確認された。これは、繊維長さが3mmについては水溶性サイジングを施した連続繊維を切断する過程で解繊し、練混ぜ前に、すでにファイバーボールを生じていたためであり、繊維長さが18mmについては微粒子のシラスバルーンの混合割合が増加すると、マトリックスの流動性が低下し、繊維分散性が悪くなったためであると考えられる。フロー値は、シラスバルーンの混合割合が増加するにつれて減少し、その程度は繊維長さが小さくなるほど大きくなる。なお、フロー値の設計目標値である130以上は、すべての割合について満足している。空気量は、シラスバルーンの混合割合や繊維長さの違いによる影響に明確な傾向はみられず、約8~11%の範囲にあり、設計

目標値の $6 \pm 2\%$ は満足されなかったが、消泡剤使用量の調整により対応できるものと考えられる。

(2) 硬化時の特性

図12に、シラスバルーン/(シラスバルーン+けい砂) に対する気乾比重 (材齢24時間後の脱型時および材齢20日後の強度試験時)、圧縮強度および曲げ強度 (材齢20日後) の変化を示す。気乾比重は、シラスバルーンの混合割合の増加にほぼ比例して減少し、繊維長さの違いによる差異はみられない。また、気乾比重の設計目標値である1.4~1.7はすべての割合について満足している。圧縮強度は、シラスバルーンの混合割合や繊維長さによらずほぼ一定で設計目標値の 200 kgf/cm^2 以上を満足している。曲げ強度は、シラスバルーンの混合割合の増加につれて若干増加し、繊維長さが10mmと18mmでは曲げ強度にそれほど差異はないが、繊維長さが3mmでは曲げ強度が他に比べてかなり小さくなっている。ここで、曲げ強度の設計目標値である 100 kgf/cm^2 以上は、繊維長さが3mmを除いてシラスバルーン/(シラスバルーン+けい砂) が0.5以上で満足される。

以上より、繊維の分散性や材齢20日後の曲げ強度の面から、繊維長さが10~18mmではシラスバルーン/(シラスバルーン+

図9 繊維長さに対する気乾比重、圧縮強度および曲げ強度の変化

図10 繊維長さに対するヤング係数および引張強度の変化 図11 シラスバルーン混合比に対するフロー値および空気量の変化

図12 シラスパルン混合比に対する気乾比重、圧縮強度および曲げ強度の変化

けい砂)は約0.5~0.75が適切であるように思われる。

0.5~0.75の範囲が適切である。

4. まとめ

本研究では、調合因子とし単位セメント量、使用けい砂の粒径、水セメント比、繊維体積率、繊維長さ、骨材中に占めるシラスパルンの混合比がCFRCのフレッシュ時および硬化時の特性に及ぼす影響について実験的に検討した。また、フレッシュ時の特性として、繊維分散性、フロー値および空気量、硬化時の特性として、気乾比重、脱型強度（材齢16時間後脱型時の圧縮および曲げ強度）および材料強度（材齢20日後の圧縮および曲げ強度）に対して設定した設計目標値を満足する範囲で、本実験で使用した材料についてCFRCの最適調合の選定を行った。その結果として次のような結論が得られた。

- 1) 所要の脱型強度および気乾比重を得るために、本実験で使用した低収縮セメントについて、単位セメント量は約 $950 \sim 1050 \text{ kg/m}^3$ の範囲で、軽量化のためにできるだけ単位セメント量を小さくするのが適切である。
- 2) 繊維分散性と材料強度の面から水セメント比は45~55%の範囲で、できるだけ小さくするのが適切である。
また、粒径の大きいけい砂5号は、曲げ強度の低下が大きいので、粒径のより小さい、ここではけい砂6, 7, 8号および粉末けい砂が適当である。
- 3) 繊維分散性や流動性の面から繊維体積率は2.5%以下、また、材料強度、特に、曲げ強度に対する繊維の補強効率を含めて考えると、繊維体積率は1.0~2.0%の範囲が適切である。
- 4) 材料強度と曲げ強度に対する繊維の補強効率の面から繊維長さは10~18mmの範囲が適切である。
- 5) シラスパルンの混合比が増加するほど、CFRCの軽量化には有効であるが、繊維分散性と材料強度（曲げ強度）の面からシラスパルン/(シラスパルン+けい砂)は約

謝辞

本研究に当たって、熊本大学工学部技官甲斐定夫氏、当時熊本大学卒論生の松尾隆一郎氏（現在、旭化成）、阿部正治氏（現在、前田建設）、中田洋二氏（現在、鹿島建設）、三菱化学の久部修弘氏をはじめ関係各位の皆様に協力を頂きました。ここに記して深謝致します。

参考文献

- 1) 秋浜繁幸ほか2名：炭素繊維補強コンクリート（CFRC）の建築構造物への適用（その1）（イラクドームへの適用検討記録）、鹿島建設技術研究所年報、第31号、pp.57-66,1983.6
- 2) 安藤達夫ほか2名：炭素繊維の土木・建築分野への応用、Mitsubishi Kasei R&D Review, Vol.2, No.2, pp.1-10, 1988
- 3) 堀島敏夫：非金属系新素材・新材料の建築への利用動向、工業材料、第38巻、第6号、pp.51-57, 1990.5
- 4) 建設省建築研究所、国土開発技術研究センター：建設省総合技術開発プロジェクト「建設事業への新素材・新材料利用技術の開発」報告書、1991.3
- 5) 坂井廣道ほか4名：炭素繊維補強コンクリートとH形鋼の合成パネルの負荷曲げ特性に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.39B, pp.343-354, 1993.3
- 6) 三井宜之ほか6名：炭素繊維補強コンクリートを用いた大型カーテンウォールの曲げ特性に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.36B, pp.233-244, 1990.3
- 7) 秋浜繁幸ほか：炭素繊維補強コンクリート（CFRC）の実験的研究（その1~その5）、鹿島建設技術研究所年報、第29,30,31,32,33号、pp.81-88, pp.57-68, pp.67-74, pp.71-78, pp.57-62, 1981~1985
- 8) 武田浩二ほか2名：炭素繊維補強軽量コンクリート（CFRC）の調査に関する実験的研究、セメント・コンクリート論文集、No.47, pp.588-593, 1993
- 9) H. Sakai et al.: Flexural Behavior of Carbon Fiber Reinforced Cement Composite, Fiber Reinforced Concrete, SP-142, ACI, pp.121-140, 1994
- 10) M. Nakamura et al.: Experimental Study for the Durability of Carbon Fiber Reinforced Cement Composites, Durability of Building Materials and Components 6, Vol.1, pp.119-128, 1993

（1995年9月26日原稿受理，1995年11月20日採用決定）